

# ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ СИММЕТРИЧНЫХ КОМПЕНСИРОВАННЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫХ АГРЕГАТОВ ДЛЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТА

Кузьмина Е.В., Самохин П.А., Тычкова О.С.  
Южно-Уральский государственный университет  
alenska139kuzmina@mail.ru

Электроснабжение городского, промышленного и магистрального железнодорожного электрического транспорта, работающего на постоянном токе, осуществляется, как правило, с помощью диодных некомпенсированных выпрямительных агрегатов. Несмотря на использование неуправляемого режима работы, некомпенсированные выпрямительные агрегаты являются потребителями значительной величины реактивной мощности. К недостаткам таких агрегатов следует отнести и существенное снижение напряжения в рабочей зоне контактной сети при возрастании числа единиц подвижного состава в ней. Это, с одной стороны, ухудшает экономические и эксплуатационные характеристики транспорта, находящегося в рабочей зоне, а с другой стороны, приводит к динамическим ударам на электрическое оборудование того транспорта, который переходит в другую зону с более высоким напряжением. Повышенное гармоническое воздействие НВП на питающую и контактную сеть, а также на сам электрический транспорт, не обеспечивает необходимый уровень электромагнитной совместимости в системе электроснабжения (СЭС). Последнее особенно проявляется в СЭС городского электрического транспорта, где продолжается использование шестифазных некомпенсированных выпрямителей.

Отмеченные и другие проблемы эффективно решаются при применении специализированных двенадцатифазных симметричных компенсированных выпрямительных агрегатов (СКВА) с пятой и седьмой гармониками напряжения на коммутирующих конденсаторах. Двенадцатифазный преобразователь содержит пару 6-фазных преобразовательных блоков с длительностью вентильных токов  $\lambda = 120$  эл. град. Условимся под входным током блока понимать фазный ток приведенной к трем фазам питающей сети 6- фазной системы вентильных токов блока. При приведении четные гармоники противофазных вентилей вычитаются. Поэтому спектр входного тока каждого блока содержит гармоники порядка  $k = 6s \pm 1$ , где  $s = 0, 1, 2, 3, \dots$ . Значениям  $s = 0, 2, 4, \dots$  отвечают четно-кратные, а значениям  $s = 1, 3, 5, \dots$  – нечетно-кратные гармоники входных токов блоков. Сформулируем общий алгоритм построения указанных выше СКВА.

1. При сохранении порядка работы вентилей осуществляют сдвиг мгновенных значений входных токов блоков на угол  $\pi/6$ . При этом фазовые сдвиги одноименных гармоник этих токов становятся равными:

$$\Delta\psi_{kl} = \pi k / 6 = \pi(6s \pm 1) / 6. \quad (1)$$

2. Проводят корректировку фазовых сдвигов гармоник в сторону восстановления совпадения фаз первых гармоник токов блоков на углы  $\mp \pi/6$ . После корректировки фазовые сдвиги гармоник составляют:

$$\Delta\psi_{k2} = \pi(6s \pm 1)/6 \mp \pi/6 = \pi s. \quad (2)$$

3. Суммарный спектр, в соответствии с (2) представляющий сумму синфазных четно-кратных гармоник входных токов блоков направляют в питающую сеть.

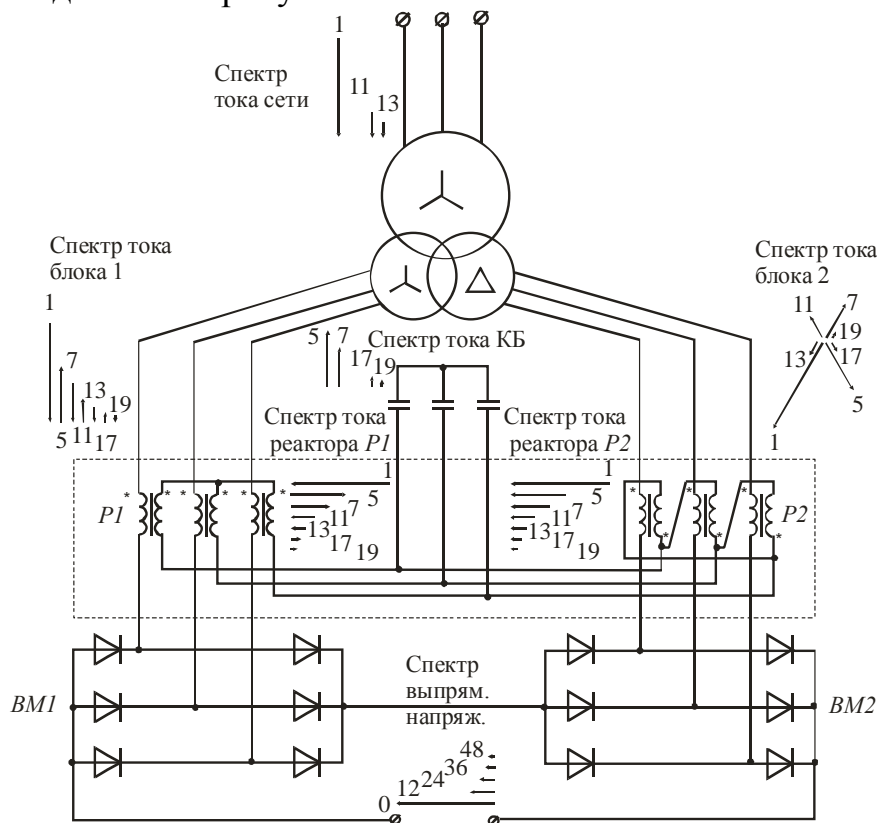
4. Выполняют инвертирование спектра входного тока одного блока по отношению к другому. В результате фазовые сдвиги одноименных гармоник становятся равными:

$$\Delta\psi_{k3} = \pi s + \pi = \pi(s + 1). \quad (3)$$

5. Суммарный спектр, в соответствии с (3) состоящий из синфазных нечетно-кратных гармоник входных токов блоков, направляют (фильтруют) в коммутирующие конденсаторы КУ.

6. Осуществляют согласование коммутирующего и номинального напряжений конденсаторной батареи.

Проиллюстрируем реализацию описанного алгоритма на примере СКВА по схеме, приведенной на рисунке.



Принципиальная схема двенадцатифазного СКВА

Первый пункт алгоритма обеспечивается сдвигом входного тока второго блока по отношению к первому блоку на 30 эл. град. за счет соединения вентильной обмотки второго блока в треугольник. Пусть обмотки первого блока имеют двенадцатую, а второго – первую группу соединения. Тогда соответствующие гармоники в спектре входного тока этого блока по отношению к пер-

вому блоку имеют начальные фазы, равные 30, 150, 210, 330, 390, 510, 570, ... эл. град. (см. спектры токов блоков 1 и 2).

Второй пункт алгоритма реализуется изменением (корректировкой) начальных фаз всех гармоник входного тока второго блока на  $-30$  эл. град. Эта корректировка по отношению к питающей сети также осуществляется трансформатором, причем для гармоник, образующих прямой порядок следования фаз (1, 7, 13, 19, ...) фаза корректируется на  $+30$  эл. град., а для гармоник, образующих обратный порядок следования фаз (5, 11, 17, ...) на  $-30$  эл. град. В результате нечетно-кратные гармоники токов (1, 11, 13, ...) первого и второго блоков становятся синфазными, а четно-кратные гармоники (5, 7, 17, 19, ...) – противофазными.

Третий пункт обеспечивается тем, что сетевой ток определяется суммой входных токов блоков, в сети проявляются лишь четно-кратные 1, 11, 13, ... гармоники токов блоков (см. спектр тока сети на рисунке).

Четвертый пункт реализуется соединением вторичных обмоток реакторов  $P1$  и  $P2$  в звезду и восстанавливающий треугольник, а также их встречным включением. В результате синфазные четно-кратные гармоники токов протекают по вторичным обмоткам реакторов, минуя конденсаторную батарею (см. спектры токов реакторов  $P1$  и  $P2$  на рисунке). Нечетно-кратные гармоники токов реакторов являются противофазными.

Пятый пункт обеспечивается тем, что ток в конденсаторной батарее определяется суммой противофазных нечетно-кратных гармоник токов вторичных обмоток реакторов  $P1$  и  $P2$ . В конденсаторы фильтруются 5, 7, 17, 19, ... и т.п. гармоники токов преобразовательных блоков. Они создают напряжения на конденсаторах с аналогичным спектром. Эти напряжения содержат преимущественно пятую и седьмую гармоники. Трансформация напряжений на конденсаторах в контуры коммутации первого и второго блоков обеспечивает решающую указанные выше проблемы опережающую одноступенчатую искусственную коммутацию вентилей СКВА.

Шестой пункт реализуется соответствующим выбором коэффициентов трансформации реакторов  $P1$  и  $P2$ .

В докладе приводятся результаты цифрового моделирования рабочих и аварийных электромагнитных процессов в СЭС с СКВА, выполненные в пакете MATLAB. Результаты моделирования подтверждены экспериментальными исследованиями СКВА на преобразовательном стенде кафедры «Системы электроснабжения» ЮУрГУ. Приводится инженерная методика расчета основных характеристик СКВА и параметров компенсирующего устройства. Результаты расчета для разработки агрегата передаются в ЗАО «Энергомаш (Екатеринбург) – Уралэлектротяжмаш».

#### *Библиографический список*

1. Хохлов Ю.И. Применение компенсированных выпрямителей для питания тяговой нагрузки // Электричество. 2008. № 4. С. 58–63.